



**TUNGA JONERS ENERGIFÖRLUST OCH SPÄRBILDNING
I FOTOGRAFISK KÄRNEMULSION**

MIKAEL JENSEN

LUND 1975

TUNGA JONERS ENERGIFÖRLUST OCH SPÄRBILDNING

I FOTOGRAFISK KÄRNEMULSION

INLEDNING

Den här avhandling behandlar spår av tunga joner i fotografisk kärnemulsion. Jonerna som studeras, utgörs av protoner som kommer ur den kosmiska strålningen, vilken främst består av relativt lättare atomkärnor med mycket höga hastigheter. Jonerna lämnar spår i emulsionen till följd av att de ioniserar emulsionens partiklar och på så sätt skapar en kedja av joniserade partiklar. Detta gör att man kan se spåren i emulsionen som en serie av små, mörka prickar som är ordnade i en linje. Detta är ett tydligt bevis på att jonerna har en viss energi och att de har förmåga att ionisera emulsionens partiklar. Detta gör att man kan använda emulsionen som ett verktyg för att studera jonernas egenskaper och för att bestämma deras energi och hastighet. Detta är en viktig del av fysikens forskning och har många praktiska tillämpningar.

av

Mikael Jensen

FK, Sm

Akademisk avhandling som för avläggande av filosofie doktorexamen vid matematisk-naturvetenskapliga fakulteten vid universitetet i Lund kommer att offentligens försvaras å Fysiska institutionens föreläsningssal B fredagen den 21 november 1975 kl. 10.15.

TUNGA JONERS ENERGIFÖRLUST OCH SPÄRRBILDNING

I FOTOGRAFISK KÄRNEMULSION

av

Mikael Jensen

Sm



21 november 1975 kl. 10.15.
Fysiska institutionens föreläsningssal B fredagen den
Fysiska instituttet i Lund kommer att offentlig försväras å
torsexamen vid matematisk-naturvetenskapliga fakulteten vid
Akademisk avhandling som för avläggande av filosofie dok-

AVHANDLINGEN

Avhandlingen omfattar följande 4 arbeten:

I The Relation Between Restricted Energy Loss and Track Width in Nuclear Emulsions.

Publicerat i Nuclear Instruments and Methods 104, 611 (1972).
(Tillsammans med L. Larsson och R. Rosander).

II Identification of Heavy Ions in Nuclear Emulsions in the Range of MeV Interval.

INLEDNING

Denna avhandling behandlar spår av tunga joner i fotografisk kärnemulsion. Jonerna som studerats, utgörs av primärpartiklar ur den kosmiska strålningen, vilken främst består av totalt joniserade atomkärnor med mycket höga hastigheter. Jonernas laddning kan relateras till bredden på det fotografiska spåret för en given partikelhastighet och typ av emulsion. Avhandling-
en omfattar dels en studie av laddningsbestämning med hjälp av sådana relationer, dels arbeten, som är avsedda att ge en mera detaljerad kännedom om spårbildningsprocessen i fotografisk kärnemulsion. Dessa senare arbeten har en mera allmän karaktär. Teorin för spårbildningen - Katz' spårteori - har på senare år utvecklats och applicerats på nya forskningsområden, t.ex. strålningsbiologi. Resultaten utgör ett stöd för Katz' teori i sin ursprungliga form som teoretisk modell för spårbildningen i kärnemulsioner.

2) Europarådet, arbetsgruppen för ryddiefysik,
sammankörda 4-5 oktober 1973.

Fontenay-aux-Roses, Frankrike.

Publicerat i Radioprotection 2, No 1, p 7 (1974).

AVHANDLINGEN

Avhandlingen omfattar följande 4 arbeten:

- I The Relation Between Restricted Energy Loss and Track Width in Nuclear Emulsions.
Publicerat i Nuclear Instruments and Methods 104, 611 (1972).
(Tillsammans med L. Larsson och R. Rosander).
- II Identification of Heavy Ions in Nuclear Emulsions in the Hundreds of MeV Interval.
LUIP-CR-74-03.
- III. Experimental and Theoretical Absorptance Profiles of Tracks of Fast Heavy Ions in Nuclear Emulsion.
(Tillsammans med L. Larsson, O. Mathiesen och R. Rosander).
Accepterat för publicering i Physica Scripta.
- IV Measured and Calculated Absorptance of Tracks of Fast Heavy Ions in Ilford G5 Nuclear Emulsion.
(Tillsammans med O. Mathiesen).
Accepterat för publicering i Physica Scripta.

Rapporter har lämnats vid

- 1) 13th International Conference on Cosmic Rays, Denver, Colorado, U.S.A., augusti 1973.
Publicerat i Proc. 13 Int. Cosm. Ray Conf., Conf. Papers, Vol. 4, p 2942, Denver, Col., U.S.A. 1973.
- 2) Europarådet, arbetsgruppen för rymdbiofysik, sammanträde 4-6 oktober 1973, Fontenay-aux-Roses, Frankrike.
Publicerat i Radioprotection 9, no 1, p 7 (1974).

- 3) Europarådet, arbetsgruppen för rymdbiofysik,
Sammanträde 23-25 september 1974, Uppsala.

Publicerat i Radioprotection 9, no 4, p 259 (1974).

I arbete I visas att det existerar en entydig relation mellan den fotometriskt uppmätta medelspårbredden och en teoretisk kvantitet, Restricted Energy Loss, (REL), som uttrycker den joniserande partikelns energiförlust i ett begränsat område kring partikelbanan. REL motsvarar Linear Energy Transfer (LET), som används inom radiofysiken. REL har i arbete I modifierats så att hänsyn endast tages till korn, som bidrager till den mätta spårbredden. Resultaten visar att entydighet under dessa förhållanden kan uppnås mellan spårbredd och jonisationsparametern REL i det undersökta laddnings- och hastighetsintervallet.

I arbete II diskuteras möjligheten att identifiera spår i kärnemulsion av partiklar i energiintervallet 400-1000 MeV/nukleon. Den kosmiska strålningens kemiska sammansättning har studerats i kärnemulsion med olika metoder, och resultaten från dessa undersökningar har visat sig ge goda resultat för såväl högenergetiska partiklar som för lågenergetiska partiklar, som stannar i emulsionen. I mellanområdet 400-1000 MeV/nucleon, som behandlas i arbete II, finns det få undersökningar. De flesta partiklar i detta energiintervall stannar inte i emulsionen, vilket innebär att räckvidden är okänd. Till skillnad från högenergetiska partiklar ändras dessa partiklars spårbredd med räckvidden. Spår av tunga joner i detta energiintervall utgör därför speciella problem i samband med laddningsidentifiëring. Det visas att dessa partiklar kan identifieras om ytterligare en parameter införs i laddningsbestämningen, ändringen i spårbredden per längd-

enhet, $d(MTW)/dR$. Med hjälp av experimentellt uppmätta spårbredder och med sambandet mellan spårbredden och REL, som beskrivs i arbete I, har relationen mellan MTW och $d(MTW)/dR$ för olika laddningar kunnat fastställas och användas för identifiering. Med hjälp av denna relation kan osäkerheten i laddningsbestämningen beskrivas som funktion av osäkerheten i de ingående parametrarna MTW och $d(MTW)/dR$. Den sistnämnda parameteren är svårast att bestämma, och det är osäkerheten i denna parameter, som framför allt bestämmer osäkerheten i identifieringen. Resultaten visar att identifieringen är möjlig med hjälp av parametrarna MTW och $d(MTW)/dR$ under förutsättning att spåren kan mätas under en lång sträcka i emulsionen.

En del kosmiska primärer kolliderar med atomkärnor i emulsionen, och med hjälp av spåren från kollisionen kan en grov uppskattning göras av den primära partikelns energi. En sådan energiuppskattning kan ersätta $d(MTW)/dR$ -parameteren, och det visas i arbete II med 12 exempel, att identifiering är möjlig under dessa förhållanden. Denna identifieringsmetod innebär, att kraven på tillgänglig spårsträcka kan sänkas avsevärt.

Relationen mellan spårbredd och REL, som används i arbetena I och II, utgör ett viktigt hjälpmedel för att beräkna bredden av ett spår från en partikel med känd laddning och hastighet. Relationen är emellertid helt empirisk och entydigheten är dessutom begränsad, vilket framgår av arbete II. Arbetena III och IV omfattar undersökning och utveckling av en mera omfattande teori som beskriver såväl spårbildningen i emulsion som ljustransporten genom emulsionen vid den fotometriska mätningen av spåret. Teorin har utvecklats av Katz och hans medarbetare (1,2) efter ett inledande arbete av Bizzeti och Della Corte (3). Katz

utgår från antagandet att det råder en viss relation mellan energidosen E och den resulterande korntätheten n :

$$n = n_0(1 - e^{-E/E_0}) \quad (1)$$

där n_0 är korntätheten i oframkallad emulsion och E_0 den dos, som orsakar framkallning av 63% av kornen. Energidosens fördelning kring spåret uträknas och spårstrukturen kan beräknas genom formel (1). Med utgångspunkt från den beräknade spårstrukturen kan transmittansen i emulsion beräknas som funktion av avståndet från spårkärnan. I Katz' senare arbeten (4) har teorin även använts för att beskriva jonisationseffekter i levande vävnad, men den fotografiska kärnemulsionen är fortfarande den detektorn, som ger största möjlighet att studera de grundläggande elementen i teorin.

Arbete III innehåller jämförelser mellan teoretiska och experimentella absorptionsprofiler i kärnemulsion. Mätningar har gjorts med profilfotometer i laddningsintervallet $14 \leq Z \leq 26$ för hastigheter från 30 till 80% av ljushastigheten. Fotometern har en spalt som är smal i förhållande till spårets bredd. Den justeras parallellt med spårets längdriktning och bilden av spåret förs över spalten vinkelrätt mot spårets längdriktning. På detta sätt erhålles en transmittansprofil av ett spårsegment, som jämförs med en teoretisk profil beräknad med hjälp av Katz' teori. Resultaten visar att tidigare beräkningar gjorda för parallellt ljus inte är realistiska för fotometrar med höga värden på den numeriska aperturen. I dessa fall måste hänsyn tas till återinspritt ljus. En semi-empirisk formel anges vilken ger en god beskrivning av de experimentella profilerna. Formeln diskuteras i detalj och ges en fysikalisk tolkning. I ett appendix diskuteras teorin för produktion av sekundärelektroner och elektron-

transport i emulsion.

Arbete IV utgör en direkt fortsättning av arbete III. Teorin som presenterades i arbete III har använts för att göra teoretiska beräkningar av data från såväl spalt- som profilfotometrar i andra undersökningar. Resultaten visar att teorin ger möjlighet till detaljerade jämförelser. En av teorins viktigaste implikationer är möjligheten till absolutkalibrering vid laddningsundersökningar.

Vid avslutandet av detta arbete vill jag framföra mitt tack till professor Krister Kristiansson för det stöd jag har fått under mitt arbete och till min medarbetare och handledare docent Olev Mathiesen för många vägledande diskussioner och för avgörande teoretiska insatser under vårt arbete med spårteorin. Jag vill också tacka mina medförfattare Leif Larsson och Reine Rosander för ett stimulerande samarbete och alla andra kamrater vid avdelningen för kosmisk högenergifysik, som på olika sätt hjälpt mig i mitt arbete. Jag tackar fröken Birgit Lindkvist för framkallnings- och scanningarbete och för den hjälp jag har fått under mitt arbete. Slutligen vill jag tacka fröken Elna-Greta Broomé för vänlig hjälp med figurmaterialet, sekreterare Malte Henrysson för utskrifter och stencileringsarbete samt instrumentmakare Uno Persson för hjälp vid apparatbyggandet.

För ekonomiskt bistånd tackas Statens Naturvetenskapliga Forskningsråd.

SUMMARY

The present thesis treats the track structure of fast heavy ions in nuclear emulsion. The experimental material was collected by exposures of nuclear emulsions to the cosmic radiation by high altitude balloons. The tracks have been studied using nuclear track photometers measuring the light absorptance of the track.

It is shown that a unique relation **exists** between the photo-metrically determined mean track width (MTW) and Restricted Energy Loss (REL). The REL concept can be seen as a first step towards a track formation theory. It takes into account the energy loss near the ion's path, but it does not reflect the emulsions response to the spatial distribution of this amount of energy. It is shown that the unique relation between MTW and REL holds for a large range of charge and velocity of the particles producing the tracks.

The relation between MTW and REL has been used to give parameters for identification of fast heavy ions in the energy interval 400-1000 MeV/n. Most of the particles in this energy interval do not stop in the emulsion, which means that their ranges are unknown. Furthermore, the track structure changes with range. Tracks of particles in this energy interval therefore offer special problems in charge investigations. It is shown that charge determination is possible with the introduction of an additional parameter into the identification procedure, the rate of change of MTW, $d(\text{MTW})/dR$. Such a method for identification is described and the expected charge resolution is given as a function of charge, energy and measured track length. It is shown that if the energy of the particles can be determined by an independent measurement, for example by an estimate of the collision energy

of particles which interact with emulsion nuclei, the identification can be considerably improved.

Although the uniqueness of the MTW-REL relation is a useful tool in emulsion technique, it is quite inadequate for a detailed description of photometer data. It must also be noted that the relation is purely empirical. A theoretical approach towards a more detailed description of nuclear tracks has been made by Katz and coworkers (1,2) after the pioneering work of Bizzeti and Della Corte (3). Katz's model for track formation takes into account the energy distribution around the particle's path which results in a distribution of developed grains assuming the formula for the expected value n of developed grain per unit volume:

$$n = n_0(1 - e^{-E/E_0}) \quad (1)$$

where n_0 is the grain density in undeveloped emulsion and E_0 the characteristic dose for sensitization and development of 63% of the grains. From the distribution of developed grains in the track a value for the transmittance of light for a beam through the track is calculated.

Transverse transmittance profiles from tracks of particles in the charge and velocity intervals $14 \leq Z \leq 26$ and $0.3 \leq \beta \leq 0.8$ have been measured by a nuclear track photometer and compared to theoretical profiles from Katz's model. Taking into account re-scattering of light into the cone of acceptance of the photometer, good agreement has been found between experimental and theoretical profiles in the entire charge and velocity interval. A semi-empirical formula for high aperture photometry is discussed as well as the theory of energy transport out from the particle's path.

Comparisons between experimental and theoretical data from other investigations reported in the literature have also been made. In most cases the theoretical predictions are in good agreement with the experimental data. The limitation of the calculations for high and low values of energy dose is discussed. The applicability of the theory to different types of photometers suggests that the theory can be used in the planning of future experiments.

REFERENCES

- 1) R. Katz and J.J. Butts,
Phys. Rev. 137, B198 (1965).
- 2) E.J. Kobetich and R. Katz,
Phys. Rev. 170, 391 (1968).
- 3) P.G. Bizzeti and M. Della Corte,
Nuovo Cimento 11, 137 (1959).
- 4) R. Katz, S.C. Sharma and M. Homayoonfar,
Nuclear Instr. and Meth. 100, 13 (1972).

